

Modélisation cohérente d'un HEMT AlGa_N/Ga_N de 0.15 μ m basés sur l'approche ASM-HEMT en prenant en compte la thermique et les pièges

A. SANTOS¹, J-C. NALLATAMBY¹, R. SOMMET¹, F. GAILLARD¹, C. CHANG²

¹ Université de Limoges, XLIM Brive, France

² United Monolithic Semiconductors SAS, Villebon-sur-Yvette, France
alexandre.santos@xlim.fr

Résumé – La littérature propose plusieurs types d'approches pour la modélisation de dispositifs Ga_N HEMT. Parmi ces dernières, les modèles basés sur les équations physiques (Physics-based) sont des plus attrayants car ils reposent sur les propriétés géométriques et de matériaux des composants ainsi que sur des équations physiques. Ils requièrent d'avoir accès à la structure du transistor et peuvent être chronophage. Dans ce papier, la modélisation en DC, impulsionnelle et paramètres S d'un transistor HEMT Ga_N en utilisant le modèle ASM-HEMT (Advanced Spice model) sera abordée. Les simulations présentées sont réalisées avec un jeu unique de paramètres et comparées avec des mesures issues d'un transistor HEMT Ga_N 6x50 μ m avec une longueur de grille de 0.15 μ m de la fonderie UMS.

1. Introduction

Le Nitrure de Gallium (Ga_N) est considéré comme le matériau le plus adapté pour la conception de dispositifs électronique comme les HEMT (High Electron Mobility Transistor) Ga_N. Les transistors HEMT Ga_N sont considérés comme les candidats idéaux pour les applications dans le domaine des hyperfréquences et particulièrement dans les bandes millimétriques. En effet, le Ga_N possède une large bande interdite (3.4 eV) ce qui en fait un candidat de choix pour les technologies dédiées aux applications nécessitant des puissances importantes. Les HEMT Ga_N, de par leurs propriétés intrinsèques (vitesse de saturation des électrons élevée, tension de claquage élevée, forte conductivité thermique, etc.), peuvent opérer à des courants importants en plus d'être reconnus comme ayant suffisamment de potentiel pour être utilisés dans des applications nécessitant des fréquences élevées. Du fait de ces propriétés remarquables, les HEMT AlGa_N/Ga_N sont largement employés dans de nombreux domaines comme ceux de l'aérospatiale, des applications militaires, de l'automobile ou encore dans les télécommunications.

La modélisation à hautes fréquences de ces composants reste une étape essentielle pour la réalisation des conceptions MMIC. En effet, un modèle représentant fidèlement le comportement d'un transistor ou d'une filière de transistors est la condition nécessaire pour la réalisation d'un design précis et optimisé. De plus, si ce dernier est basé sur la physique, il peut permettre

d'améliorer le design des composants afin d'améliorer leurs performances. Ainsi, après une brève description du modèle ASH-HEMT, ce papier a pour objectif de décrire la méthode d'extraction des paramètres du modèle ASM-HEMT afin de pouvoir simuler le comportement d'un transistor. Dans ce travail, afin de démontrer les qualités du modèle ASM-HEMT, un seul jeu de paramètres est utilisé pour l'ensemble des simulations et ces dernières sont ensuite validées avec des mesures expérimentales réalisées sur un transistor HEMT AlGa_N/Ga_N avec une longueur et largeur de grille de 0,15 μ m et 6x50 μ m respectivement.

2. Modèle ASM-HEMT

Dans cette section, nous proposons de discuter de l'approche du modèle de potentiel de surface [1] pour les dispositifs à haute fréquence et notamment pour les HEMT Ga_N. Notre étude se porte en particulier sur un modèle de potentiel de surface appelé ASM-HEMT développé par l'IIT Kanpur en Inde. Ce modèle est à mi-chemin entre un modèle purement physique et un modèle empirique. Ce type de modèle pourrait être privilégié pour la prochaine génération de modèles compacts car il répond d'une part aux critères du standard « Compact Model Coalition » (CMC) nécessaires afin de pouvoir être utilisé par les industriels et incorporé dans les logiciels de simulation. Le modèle ASM-HEMT a été mis en œuvre dans le logiciel ADS de Keysight et est aujourd'hui utilisé par de nombreuses entreprises. Son intérêt repose sur la prise en compte des paramètres liés à la structure et la nature des matériaux des dispositifs réels, permettant une meilleure précision des simulations électriques dans des temps relativement courts. Le concepteur gagne ainsi en précision et en fidélité sur les résultats des simulations de son circuit permettant de minimiser le nombre de "runs" nécessaires. De plus, de nombreux paramètres du modèle sont liés à des paramètres géométriques de la structure du transistor (longueur de grille L, largeur de grille W_g, nombre de doigts NF, épaisseur de barrière t_{bar}, longueur de source de grille LSG, longueur de drain de grille LGD, ...), ce qui en fait un modèle évolutif permettant aussi d'être un outil prédictif utile pour l'optimisation des technologies.

3. Brève présentation du modèle ASM

Le principal défi dans le développement d'un modèle basé sur la physique est de calculer avec précision les charges dans le puits quantique. Les modèles présentés dans la littérature sont assez complexes, car ils nécessitent le calcul du niveau de Fermi pour chaque région de fonctionnement du dispositif. Dans le modèle ASM-HEMT, Khandelwal et al [4] ont développé une solution unifiée de E_f , valable dans toutes les régions de fonctionnement, avec une très grande précision de l'ordre du femtovolts dans la région proche de la tension de pincement, comme indiqué ci-dessous :

$$E_{f,unified} = V_{go} - \frac{2V_{th} \ln\left(1 + e^{\frac{V_{go}}{2V_{th}}}\right)}{\frac{1}{H(V_{go})} + \frac{C_g}{qD} e^{-\frac{V_{go}}{2V_{th}}}} \quad (1)$$

$$\text{With } H(V_{go}) = \frac{V_{go} + V_{th}[1 - \ln(\beta V_{gon})] - \frac{\gamma_0}{3} \left(\frac{C_g V_{go}}{q}\right)^{2/3}}{V_{go} \left(1 + \frac{V_{th}}{V_{god}}\right) + \frac{2\gamma_0}{3} \left(\frac{C_g V_{go}}{q}\right)^{2/3}} \quad (2)$$

Où $V_{g0} = V_{gs} - V_{off}$, V_{off} est la tension de pincement, V_{th} est la tension thermique/tension à l'équilibre thermique, q la charge de l'électron, D la densité d'état, $\beta = \frac{C_g}{qDV_{th}}$, γ_0 est un paramètre dérivé du premier niveau d'énergie E_0 utilisé dans la description de la densité 2DEG, V_{god} et V_{gon} sont des fonctions de lissage sur V_{g0} . L'énergie de Fermi ainsi obtenue est ensuite utilisée pour calculer les potentiels de surface côté source et côté drain ψ_s et ψ_d . Ces derniers servent ensuite pour calculer les charges intrinsèques et le courant de drain. Les mécanismes de « dérive diffusion » du transport des porteurs sont inclus pour calculer le courant de drain dans le modèle, comme indiqué ci-dessous.

$$I_d = \frac{W}{L} \mu C_g (V_{g0} - \psi_m + V_{th}) \psi_{ds} \quad (3)$$

Où W est la largeur du canal, L la longueur du canal, μ la mobilité des électrons, C_g la capacité de la grille/unité de surface ($\epsilon_{AlGaIn}/t_{bar}$), $\psi_m = (\psi_s + \psi_d)/2$ le potentiel de surface au point médian entre la "source intrinsèque" et le "drain intrinsèque".

Les équations pour le calcul des charges dans le canal sont obtenues en utilisant le partitionnement de Ward-Dutton :

$$Q_d = \int_0^L \frac{x}{L} Q_{ch}(V_g, V_x) dx \quad (4)$$

$$Q_s = \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right) Q_{ch}(V_g, V_x) dx \quad (5)$$

$$Q_g = -Q_s - Q_d \quad (6)$$

Q_{ch} est exprimé à partir du potentiel de surface. La charge dans le canal, le potentiel de surface et le transport des porteurs représentent le cœur du modèle ASM-HEMT. Enfin, un grand nombre d'effets physiques sont ajoutés autour de la formulation du courant comme le montre la **Figure 1**.

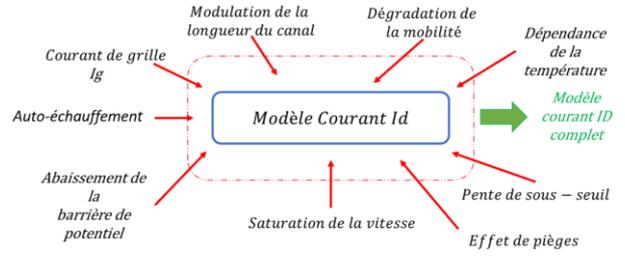


Figure 1. Représentation des effets pris en compte dans le modèle ASM-HEMT.

4. Méthodologie pour l'extraction des paramètres du modèle

L'objectif est de trouver une méthodologie pour extraire un ensemble unique de paramètres pour toutes les conditions de fonctionnement (DC, IV pulsé ou petit signal). Cette tâche peut s'avérer fastidieuse, car le modèle ASM comporte plus de 100 paramètres. Dans ce grand ensemble de paramètres, certains sont relatifs au potentiel de surface et au modèle de courant de drain. D'autres concernent les effets parasites tels que l'auto-échauffement, les effets de pièges, ainsi que les effets de canal court, [3][4] ...

Pour commencer, les paramètres géométriques (nombre de doigts, largeur de la grille, épaisseur de la barrière, ...) et les paramètres matériaux (mobilité et saturation de la vitesse des électrons, permittivité de la barrière...) sont fixés et une première comparaison entre les courbes simulées et mesurées est réalisée lorsque la plaque est à température ambiante (25~30°C). L'auto-échauffement n'est initialement pas pris en compte. Les paramètres représentant la dépendance thermique influencent beaucoup sur le modèle. Certains paramètres peuvent être extraits en continu (sur des réseaux I(V) en DC par exemple) alors que d'autres nécessitent d'être extraits à l'aide de mesures impulsives. Il est possible d'extraire un certain nombre de paramètres à partir des courbes I(V) DC. En effet, plusieurs effets physiques tels que les effets de canal court (η_0 , v_{dsc} , v_{off} , ...) ou le courant de grille de fuite I_g par exemple peuvent être identifiés sur ces courbes. La **Figure 2**, en plus d'illustrer le point précédent, montre également qu'il est possible d'extraire les mêmes paramètres via des tracés différents ainsi que la possibilité de pouvoir extraire différents paramètres d'une même zone d'une courbe. Le déroulement du processus est également indiqué sur la **Figure 2**. Les paramètres restants (pièges, paramètres de capacité parasite, paramètres thermiques, ...) peuvent être extraits à partir de mesures pulsées, paramètres S, etc.

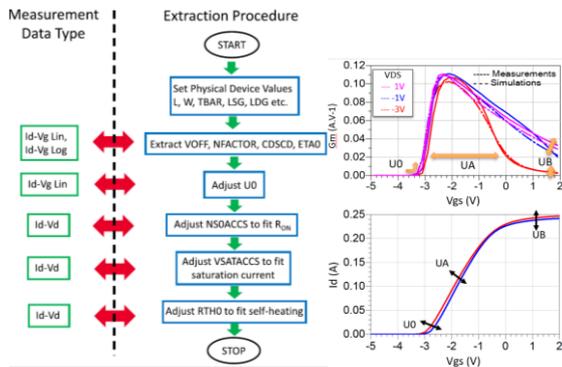


Figure 2. Déroulement du processus d'extraction des paramètres et exemples de détermination et d'extraction de paramètres

Il est recommandé de toujours comparer toutes les courbes de mesures et les courbes simulées chaque fois qu'un paramètre a besoin d'être modifié, afin de s'assurer que les effets qui ont été ajustés précédemment ne soient pas modifiés. Les éléments extrinsèques tels que les capacités, les résistances et les inductances des « pad RF » doivent être ajoutés au modèle ASM-HEMT. Ils sont, eux aussi, extraits grâce aux mesures des paramètres S à basse fréquence.

Les résistances non linéaires (R_d et R_s) sont déjà présentes dans le modèle ASM-HEMT. Cependant, une résistance R_g doit être ajoutée au circuit électrique. Les mesures impulsionnelles et notamment les mesures IDLTS (Current-Deep Level Transient Spectroscopy) sont utiles pour déterminer les paramètres de piège (constantes de temps des pièges, signatures) et les paramètres indépendants de la température. Il est également possible d'ajuster les paramètres de piège obtenu précédemment avec des mesures des paramètres Y (en utilisant la partie imaginaire du paramètre Y_{22}) pour de faibles fréquences (typiquement de 100Hz jusqu'à 1MHz) [5]. L'ensemble des paramètres obtenus a été ajusté sur les différents types de mesures (DC, pulsé, paramètres S ...) afin de faire correspondre les simulations aux mesures. Enfin, la dernière étape consiste à valider les paramètres thermiques du modèle en fonction de la température en faisant varier la température de « chuck thermique » lors des différents types de mesures réalisées sur le wafer.

5. Résultats des mesures et des simulations

5.a. Mesures DC et comparaison avec le modèle

La plupart des valeurs attribuées aux paramètres du modèle peuvent être extraites à partir de mesures en courant continu I(V). La **Figure 3** présente la comparaison du courant entre les mesures et la modélisation pour deux températures de chuck différentes (30°C et 100°C). Ces courbes présentent un écart. Selon nous, cet écart

probablement dû à une prise en compte imparfaite de la température dans les équations du modèle ASM-HEMT.

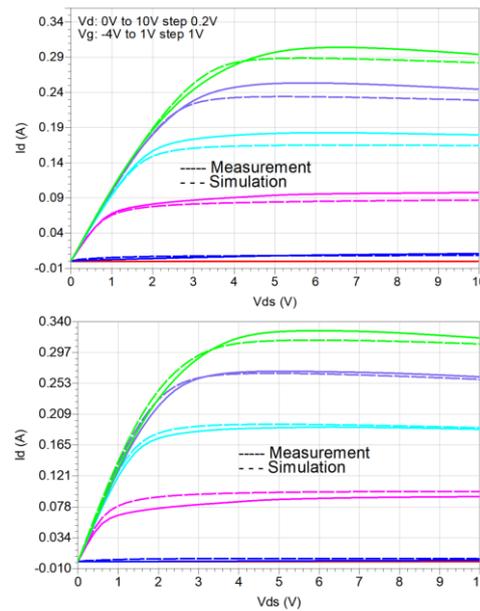


Figure 3. Courbes $I_d(V_d)$ mesurées et simulées en courant continue pour un HEMT GaN 6x50 μm GaN à $T=30^\circ\text{C}$ (gauche) et $T=100^\circ\text{C}$ (droite).

5.b. Mesures et simulations impulsionnelles

Les mesures IV pulsées sont généralement utilisées pour fortement limiter les effets d'auto-échauffement dans le transistor. La **Figure 4a** montre une augmentation du courant de drain en fonction de V_{ds} par rapport aux courbes en courant continu. Le modèle ASM-HEMT semble avoir des difficultés à représenter le comportement du courant, en particulier pour des V_{ds} élevés. La **Figure 4b** montre les caractéristiques I-V pulsées des HEMT GaN dans des conditions de tensions de grille et de drain au repos variables (V_{gsq} , V_{dsq}). L'effet de gatelag reste très peu présent sur les simulations. Il reste également peu marqué en mesure. Le phénomène de drainlag, quant à lui, a été observé sur les mesures ainsi que sur les simulations.

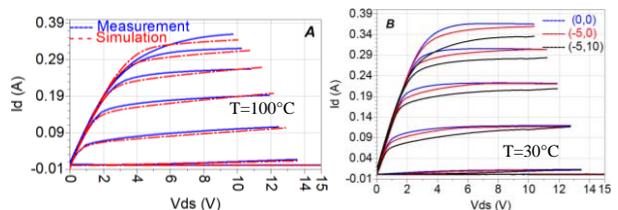


Figure 4. Mesures IV pulsées à droite pour différentes valeurs de (V_{gsq} , V_{dsq}). Mesures et simulations pour un point de polarisation de (-5,15) à gauche pour un transistor HEMT GaN de 6x50 μm .

5.c. Investigation des effets de pièges à l'aide de mesures d'admittance BF

Afin de vérifier la cohérence des valeurs des paramètres de piège, nous avons comparé la partie imaginaire simulée et mesurée du paramètre Y_{22} extraite des mesures du paramètre S BF entre 100Hz et 1MHz pour $V_{ds} = 10\text{V}$ et 20V [5]. La variation de la fréquence maximale avec la température permet d'extraire la

constante de temps de piège τ_{fill} ($\tau_{fill} = 1/2\pi f$). L'effet des mécanismes de piège sur la dispersion en fréquence de l'admittance de sortie et de la transconductance est modélisé par l'utilisation d'un réseau RC parasite supplémentaire pour chaque localisation des pièges (gate lag et drain lag). La tension V_{trap} aux bornes de ces deux cellules est réinjectée au sein des paramètres du modèle tels que la tension de pincement, la pente de sous-seuil, les résistances de source et de drain afin de modéliser les effets des pièges. Un modèle simple avec des constantes de temps (extraites des mesures I-DLTS et Y22) différentes pour le drain lag et le gate lag est utilisé dans le modèle ASM-HEMT. La **Figure 5** montre le bon accord entre la simulation et la mesure du paramètre Y22 pour les deux valeurs de V_{ds} . Les signatures des pièges (E_a , σ_n) extraites en utilisant l'équation d'Arrhenius à partir des mesures IDLTS et des paramètres Y sont en accord avec celles trouvées dans la littérature pour les HEMT GaN dopés Fe [5].

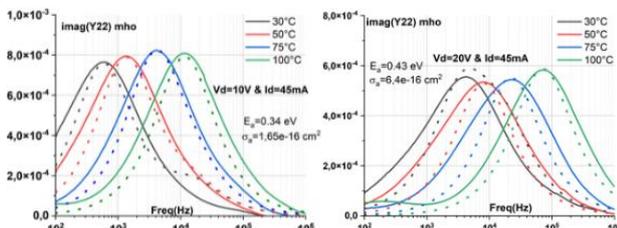


Figure 5. Lignes droites : données mesurées et lignes pointillées : données simulées de Y22 pour un transistor HEMT GaN de 6x50µm à T=30°C pour $V_{ds}=10V$ et $20V$.

5.d. Mesures et simulation de paramètres S

Dans cette section, nous présentons une comparaison entre les mesures et les modélisations des paramètres S pour $V_{ds}=10V$ et $20V$ et pour $I_d=45mA$ ($150mA/mm$) et $75mA$ ($250mA/mm$) sur une gamme de fréquences de 1GHz à 50GHz. La comparaison des coefficients de réflexion S11 et S22, du coefficient de transmission S21 et du MAG est illustrée à la **Figure 6**. Les comparaisons entre la simulation et la mesure montrent un très bon accord pour les deux points de polarisation en classe AB.

6. Conclusion

Le modèle ASM-HEMT basé sur le potentiel de surface a été utilisé pour représenter le comportement d'un transistor GaN HEMT de 6x50µm avec un unique ensemble de paramètres. Le modèle a été validé en comparant les résultats de simulation du modèle avec les mesures réalisées en courant continu, IV pulsée et paramètres S pour 2 points de polarisation dans la classe AB. Les futurs travaux se concentreront sur l'amélioration des parties du modèle ASM-HEMT relatives aux effets de pièges (topologie du modèle et dépendance thermique du modèle de pièges) et à la thermique ainsi que la validation du modèle en large signal.

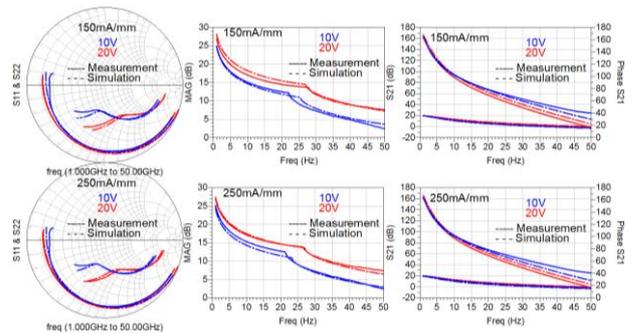


Figure 6. Paramètres S pour une température de plaque de T=30°C sur un HEMT GaN de 6x50µm pour $V_{ds}=10V$ (bleu) et $V_{ds}=20V$ (rouge) avec les effets thermiques et de pièges activés.

7. Remerciements

Nous remercions le projet GREAT DGA/CNRS et le Labex GaNext pour leur soutien financier.

Références

- [1] S. Khandelwal, Y. S. Chauhan and T. A. Fjeldly, "Analytical Modeling of Surface-Potential and Intrinsic Charges in AlGaIn/GaN HEMT Devices", in *IEEE TED*, vol. 59, no. 10, pp. 2856-2860, Oct. 2012.
- [2] D. L. John, F. Allerstam, T. Rödle, S. K. Murad and G. D. J. Smit, "A surface-potential based model for GaN HEMTs in RF power amplifier applications", *2010 International Electron Devices Meeting*, 2010
- [3] R. Sommet, J. A. S. Dos Santos, A. Santos and J. C. Nallatamby, "High frequency GaN HEMT Modeling with ASM-HEMT", *2022 17th (EuMIC)*, Milan, Italy, 2022, pp. 145-148, doi: 10.23919/EuMIC54520.2022.9923430.
- [4] S. Khandelwal *et al.*, "ASM GaN: Industry Standard Model for GaN RF and Power Devices—Part 1: DC, CV, and RF Model", in *IEEE TED*, vol. 66, no. 1, pp. 80-86, Jan. 2019, doi: 10.1109/TED.2018.2867874.
- [5] M. Bouslama *et al.*, "Dynamic Performance and Characterization of Traps Using Different Measurements Techniques for the New AlGaIn/GaN HEMT of 0.15µm Ultrashort Gate Length", in *IEEE T-MTT*, vol. 67, no. 7, pp. 2475-2482, July 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2907540.